JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number: 06249624
(43)Date of publication of application: 09.09.1994

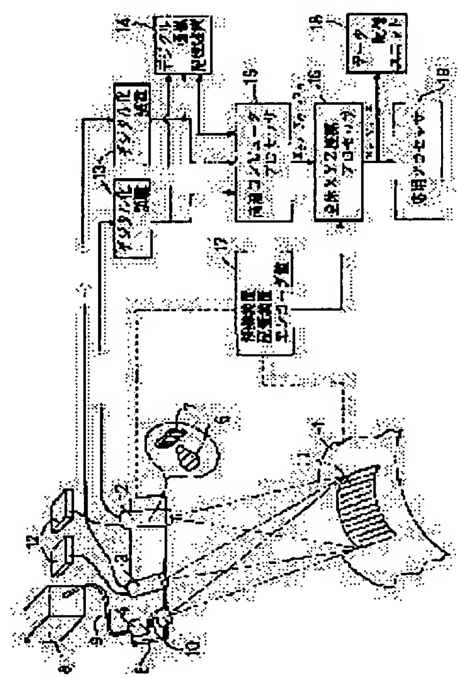
(51)Int.Cl. G01B 11/24

(21)Application number: 05035634
(22)Date of filing: 24.02.1993

(71)Applicant: OPTON CO LTD
(72)Inventor: JIYON EMU FUITSUTSU

(54) INSTRUMENT FOR MEASURING THREE-DIMENSIONAL SURFACE SHAPE

(57)Abstract:



PURPOSE: To execute dimension measurement, surface inspections, and reverse CAD functions on an object to be measured by accumulating the XYZ coordinate data of the surface section of the object at a high speed.
CONSTITUTION: The title instrument is provided with a projector 4 which projects the surface section of an object 1 to be measured with a fringe pattern and camera units 2 and 3 which receive reflected light from the surface section and the visual axis of the camera unit 2 is deflected from that of the projector 4 by 19— to 90—. The visual axis of the camera unit 3 is deflected from that of the camera unit 2 by at least 3—. In addition, the camera unit 2 sends first electric signals representing the reflected light received by the unit 2 and the camera unit 3 sends second electric signals representing the reflected light received by the unit 3.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]	07.01.2000
[Date of sending the examiner's decision of rejection]	
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]	
[Date of final disposal for application]	
[Patent number]	
[Date of registration]	
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]	
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]	
[Date of extinction of right]	

(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報（A）　(11)特許出願公開番号

特開平6－249624

(43)公開日　平成6年(1994)9月9日

(51)Int.Cl.⁵　識別記号　庁内整理番号　ＦＩ　技術表示箇所
Ｇ０１Ｂ　11/24　Ｃ　9108－２Ｆ

審査請求　未請求　請求項の数４５　ＯＬ　（全２０頁）

(21)出願番号　特願平5-35634

(22)出願日　平成5年(1993)2月24日

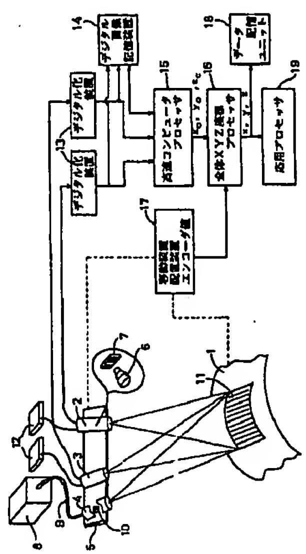
(71)出願人　000150213
株式会社オプトン
愛知県瀬戸市穴田町970番地の2

(72)発明者　ジョン　エム　フィッツ
アメリカ合衆国、カリフォルニア州　90402、サンタ　モニカ、ユークリッド　ストリート　528

(74)代理人　弁理士　足立　勉

(54)【発明の名称】３次元表面形状測定装置

(57)【要約】
【目的】　高速で測定物の表面部分のＸＹＺ座標データを集積し、寸法測定や表面検査、リバースＣＡＤ機能を実行する。
【構成】　測定物１の表面部分をフリンジパターンを伴って投影する投影器４と、表面部分からの反射光を受け取るカメラユニット２、３を備え、カメラユニット２の視軸は投影器４の視軸に対して１９°から９０°の角度であり、カメラユニット３はカメラユニット２の視軸と少なくとも３°離れている。またカメラユニット２は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、カメラユニット３は受け取った反射光を表す第二電気信号を送る。



【特許請求の範囲】
【請求項１】　少なくとも二つの電気信号から測定物の表面を決定するために使用される３次元表面形状測定装置において、
少なくとも測定物の表面部分を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段と、
前記表面部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つの手段を備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の視軸に対して第一角度をなす視軸を有し、その第二手段は前記第一照射手段の視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なり、
前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気信号を送ることを特徴とする３次元表面形状測定装置。
【請求項２】　前記第一照射手段はロンチ格子を有し、ここを照射光が透過して前記測定物の前記表面部分上に前記フリンジパターンを形成することを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項３】　前記第一照射手段は変形ロンチ格子を有し、ここを照射光が透過して前記測定物の前記表面部分上に前記フリンジパターンを形成し、前記変形ロンチ格子は透明な帯と不透明な帯を交互に有し、該不透明な帯は該透明な帯より幅が広いことを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項４】　前記不透明な帯は前記透明な帯の約３倍の幅であることを特徴とする請求項３に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項５】　前記第一照射手段は可変フリンジ格子を形成する手段を有することを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項６】　可変フリンジ格子を形成する前記手段が照射パターンを形成する伝達及び非伝達部分を有する液晶ディスプレイであることを特徴とする請求項５に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項７】　前記第一手段は精密ビデオカメラであり、その前記第一電気信号が前記表面部分上の複数のＸＹＺ座標点に関する情報を少なくとも有し、
前記第二手段は粗目ビデオカメラであり、その前記第二電気信号が前記表面部分上のフリンジパターンの位置を前記第一手段からの前記情報に基づき個々に決定する情報を少なくとも有することを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項８】　前記第一手段が前記表面部分に対しほぼ垂直に配置され、前記第一角度が１９°から９０°までの範囲であり、前記第二手段の視軸は前記第一手段の視軸から少なくとも３°離れているように配置されることを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項９】　前記３次元表面形状測定装置が照射光源から離れて位置しており、その照射光源は光学ファイバー線を介して前記第一照射手段に接続されていることを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項１０】　前記第一照射手段が連続的な照射を行うことを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項１１】　前記第一照射手段がストロボ照射を行うことを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項１２】　前記第一照射手段は細いスペクトル帯の可視レーザー光を照射し、反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段はそれぞれ細い通過帯域のスペクトルフィルターを有することを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項１３】　前記第一照射手段がストロボ白色光照射器を有することを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項１４】　前記３次元表面形状測定装置が前記測定物の前記表面部分を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する第二照射手段を備え、該第二照射手段は前記第一照射手段の視軸と異なる配置の視軸を有し、前記第一照射手段は垂直なフリンジパターンを投影し、前記第二照射手段は水平なフリンジパターンを投影し、前記垂直及び水平なフリンジパターンは前記表面部分に交互に投影されることを特徴とする請求項１に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項１５】　反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段の視界における水平方向の約４５°以内に配置された前記表面部分の部分エッジに応答して、前記第一照射手段を選択する手段と、
反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段の視界における垂直方向の約４５°以内に配置された前記表面部分の部分エッジに応答して、前記第二照射手段を選択する手段を備えることを特徴とする請求項１４に記載の３次元表面形状測定装置。
【請求項１６】　前記３次元表面形状測定装置は前記測定物の前記表面部分を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する第二照射手段を有し、
前記第二照射手段は前記第一照射手段の前記視軸とは異なる配置の視軸を有し、前記第一照射手段は二つの隣合った垂直フリンジパターンを同時に投影し、前記第二照射手段は二つの隣合った水平フリンジパターンを同時に投影し、
前記隣合った垂直及び水平フリンジパターンのうち一方は狭い視界のフリンジパターンであり、他方は広い視界のフリンジパターンであり、
前記３次元表面形状測定装置はさらに反射光を受け取る第三手段を備え、該第三手段は広い視界のフリンジパタ

ーンを写すために広い視界を有し、前記第一手段及び第二手段は狭い視界のフリンジパターンを写すために狭い視界を有することを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項17】 前記少なくとも第一照射手段は照射光線を送る手段と、その照射光線を視準する手段と、視準された照射光線が透過するフリンジ格子を形成する手段と、前記表面部分上の前記フリンジパターンの被写界深度を増大させる手段と、前記フリンジパターンの焦点を前記表面部分に合わせる手段を備えることを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項18】 照射光線を視準する前記手段がコンデンサレンズであることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項19】 被写界深度を増大させる前記手段がピンホール穴であることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項20】 照射光線を視準するための前記手段が円筒状のコンデンサレンズであり、被写界深度を増大させる前記手段が格子を形成する前記手段と平行に配置されたスリット穴であり、前記フリンジ格子が不透明及び透明のほぼ直線の複数の帯が交互に並んだものであることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項21】 フリンジパターンを形成する前記手段がロンチ格子であることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項22】 フリンジパターンを形成する前記手段が不透明な帯と透明な帯とを交互に有する変形ロンチ格子であり、前記不透明な帯が前記透明な帯よりも幅広いことを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項23】 前記不透明な帯の幅が前記透明な帯の幅の3倍であることを特徴とする請求項22に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項24】 フリンジパターンを形成する前記少なくとも一つの手段が、種々の照射パターンを形成する伝達部分と非伝達部分とを有する液晶ディスプレイであることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項25】 前記3次元表面形状測定装置は前記少なくとも第一照射手段と反射光を受け取る前記二つの手段を前記測定物の位置に対して静止位置に支持する手段を有し、前記測定物は移動可能であることを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項26】 前記3次元表面形状測定装置は前記少なくとも第一照射手段及び反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段を前記測定物と相対的に移動させる手段を有し、前記測定物は静止していることを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項27】 前記3次元表面形状測定装置は前記少なくとも第一照射手段及び反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段と相対的に前記測定物を移動させる手段を有し、さらに前記3次元表面形状測定装置は前記少なくとも第一照射手段及び反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段を移動させる手段を有することを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項28】 測定物の表面を少なくとも二つの電気信号から決定するための3次元表面形状測定装置において、

測定物の少なくとも表面部分を二つの隣合った垂直なフリンジパターンを伴って照射する第一照射手段と、

前記測定物の前記表面部分を二つの隣合った水平なフリンジパターンを伴って照射する第二照射手段と、

前記表面部分からの反射光を受け取る少なくとも三つの第一、第二、第三手段とを備え、該少なくとも三つの手段の各々が前記第一照射手段に対し一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の視軸に対し第一角度をなす視軸を有し、その第二手段は前記第一照射手段の視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度と異なり、前記第二照射手段の視軸は前記第一照射手段の視軸と異なった配置であり、

前記隣合った垂直及び水平フリンジパターンのそれぞれにおいて、一方は狭い視界のフリンジパターンであり他方は広い視界のフリンジパターンであり、

前記少なくとも三つの手段のうちの第三手段は広い視界のフリンジパターンを写すために広い視界を有し、前記第一手段及び第二手段は狭い視界のフリンジパターンを写すためにそれぞれ狭い視界を有し、

前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気信号を送ることを特徴とする3次元表面形状測定装置。

【請求項29】 前記第一手段は精密ビデオカメラであり、その前記第一電気信号が前記表面部分上の複数のXYZ座標点に関する情報を少なくとも有し、

前記第二手段は粗目ビデオカメラであり、その前記第二電気信号が前記表面部分上のフリンジパターンの位置を前記第一手段からの前記情報に基づき個々に決定する情報を少なくとも有することを特徴とする請求項28に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項30】 前記第一手段が前記表面部分とほぼ垂直に配置され、前記第一角度が19°から90°の範囲内であり、前記第二手段の視軸が前記第一手段の視軸と少なくとも3°はなれているように配置されることを特徴とする請求項28に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項31】 測定物の表面を少なくとも二つの電気信号から決定するための3次元表面形状測定装置において、測定物の少なくとも表面部分を少なくとも一つの第一フリンジパターンを伴って照射する第一照射手段と、

前記測定物の前記表面部分を少なくとも一つの第二フリ

ンジパターンを伴って照射する第二照射手段と、

前記表面部分からの反射光を受け取る少なくとも二つの第一、第二手段とを備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段及び第二照射手段に対し一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の視軸に対し第一角度をなす視軸を有し、その第二手段は前記第一照射手段の視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度と異なり、

前記第二照射手段の視軸は前記第一照射手段の前記視軸と異なり、

前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気信号を送ることを特徴とする3次元表面形状測定装置。

【請求項32】 前記第一照射手段は垂直フリンジパターンを投影し、前記第二照射手段は水平フリンジパターンを投影し、前記垂直及び水平フリンジパターンは前記表面部分上に交互に投影されることを特徴とする請求項31に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項33】 反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段の視界における水平方向の約45°以内に配置された前記表面部分の部分エッジに対し、前記第一照射手段を選択する手段と、

反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段の視界における垂直方向の約45°以内に配置された前記表面部分の部分エッジに対し、前記第二照射手段を選択する手段を備えることを特徴とする請求項31に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項34】 前記第一手段は精密ビデオカメラであり、その前記第一電気信号が前記表面部分上の複数のXYZ座標点に関する情報を少なくとも有し、

前記第二手段は粗目ビデオカメラであり、その前記第二電気信号が前記表面部分上のフリンジパターンの位置を前記第一手段からの前記情報に基づき個々に決定する情報を少なくとも有することを特徴とする請求項31に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項35】 前記第一手段が前記表面部分とほぼ垂直に配置され、前記第一角度が19°から90°の範囲内であり、前記第二手段の視軸が前記第一手段の前記視軸と少なくとも3°はなれているように配置されることを特徴とする請求項31に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項36】 測定物の表面を少なくとも二つの電気信号から決定するための3次元表面形状測定装置において、

測定物の少なくとも表面部分をフリンジパターンを伴って照射し、照射光線を送る手段と、その照射光線を視準する手段と、その視準された照射光線が透過するフリンジ格子を形成する手段と、前記表面部分上の前記フリンジパターンの被写界深度を増大する手段と、そのフリンジパターンの焦点を前記表面部分に合わせる手段を有す

る少なくとも第一照射手段と、

各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配置を有し、第一手段は前記第一照射手段の前記視軸に対して第一角度をなす視軸を有し、第二手段は前記第一照射手段の前記視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なる、前記表面部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つの手段を備え、

前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気信号を送ることを特徴とする3次元表面形状測定装置。

【請求項37】 照射光線を視準する前記方法がコンデンサレンズであることを特徴とする請求項36に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項38】 被写界深度を増大する前記手段がピンホール穴であることを特徴とする請求項36に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項39】 照射光線を視準する前記手段が円筒状のコンデンサレンズであり、被写界深度を増大させる前記手段が格子を形成する前記手段と平行に配置されたスリットであり、前記フリンジ格子が不透明と透明のほぼ直線の複数の帯が交互に並んだものであることを特徴とする請求項36に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項40】 フリンジパターンを形成する前記手段がロンチ格子であることを特徴とする請求項36に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項41】 フリンジパターンを形成する前記手段が不透明と透明の帯が交互に並ぶ変形ロンチ格子であり、前記不透明な帯の幅が前記透明な帯の幅より広いことを特徴とする請求項36に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項42】 前記不透明な帯の幅が前記透明な帯の幅の約3倍であることを特徴とする請求項39に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項43】 測定物の表面を少なくとも二つの電気信号から決定するための3次元表面形状測定装置において、

光を供給する光源手段と、その光源手段から光を受取りその光の焦点を光学的画像投影器上に再び合わす円筒状コンデンサレンズ構造と、その円筒状コンデンサレンズ構造の出力側付近に位置するほぼ平行な線形フリンジパターンを形成するパターン手段と、そのパターン手段と光学的画像投影器の間に位置し各フリンジパターンの横断方向ではなく長さ方向に沿ってディフォーカスを形成するスリット穴手段を有する、測定物の少なくとも表面部分を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段と、

前記表面部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つの手段を備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の視軸に対して第一角度をな

す視軸を有し、その第二手段は前記第一照射手段の視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なり、

前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気信号を送ることを特徴とする３次元表面形状測定装置。

【請求項４４】　測定物の表面を決定する３次元表面形状測定装置において、

測定物の少なくとも表面を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段により照射し、

各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配置を有し、精密カメラは前記第一照射手段の前記視軸に対して第一角度をなす視軸を有し、粗目カメラは前記第一照射手段の前記視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なる、前記表面部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つのカメラを供給し、

測定物の精密カメラと粗目カメラとの関係を示す３次元部分座標を供給し、

前記精密カメラから得たピクセル座標及び位相値の第一組を出力し、

前記粗目カメラから得たピクセル座標及び位相値の第二組を出力し、

各第一組及び第二組はそれぞれのピクセル座標から第一原展開位相値及び第二原展開位相値を各々取り出し、

第一原展開位相値及び第二原展開位相値、並びに第一組及び第二組のピクセル座標に基づき第一真整数値及び第二真整数値を算出し、

第一真整数値及び第二真整数値に基づき精密カメラの位相マップを形成し、

部分座標系に基づき部分マップ上に位相マップを形成し、測定物表面部分を表す最終的な３次元座標組を形成する３次元表面形状測定装置。

【請求項４５】　最終的な３次元座標組に基づき測定物の表面部分の形状を描写するリバースコンピュータエイデッドデザイン操作を行う工程を含む請求項４４に記載の３次元表面形状測定装置。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【産業上の利用分野】本発明は、ＸＹＺ座標データ集積装置及びシステムに関する。データ集積速度や機械的信頼性の欠如、装備コストの問題により、従来技術では達成できなかったような種々の重要な表面検査機能及びリバースコンピュータエイデッドデザイン（以下リバースＣＡＤと略す）機能を有する３次元表面形状測定装置に関する。

【０００２】

【従来の技術】従来のＸＹＺ座標データ集積システムは、座標軸測定器（以下ＣＭＭと略す）を用いた一点接触プローブ型が一般的であった。このＣＭＭシステムの場合、一つのＸＹＺ座標データを得るためには、ＸＹＺ座標の広範囲にわたりプローブを機械的に移動させて測定部分に接触させなければならない。さらに速度上の制約として、プローブを軽く接触させるためにその機械的ユニットの動きを接触点間で加速及び減速させる必要がある。速度を向上させようとすると、機械的摩耗や衝撃その他の信頼性上の問題を防ぐためより複雑で高価な機械的ユニットを用いらなければならない。その他、三角測量の理論に基づく一点非接触型プローブが開発され、これによりプローブが測定部分に接触する必要はなくなったが、測量個所データを集積するため広範囲にわたりプローブを機械的に動かす必要性は依然として残っている。

【０００３】その他のＸＹＺ座標データシステムとしては、米国特許４、８９５、４３４号に記載されているようなレーザー光線走査技術が挙げられる。このシステムによれば、例えばＣＣＤビデオカメラのような映像センサが測定部分の範囲を写す。そしてオフセットアングルのレーザー光線をカメラの検査範囲に機械的に掃引する。こうして多数の画像が集積されてデータ処理が行われ、ＸＹＺ座標の測定表面に関する情報が得られる。レーザー光線が機械的に走査し画像が集積されている間、カメラは測定部分に対し一定の時間静止していなければならない。一般に一秒間あるいはそれ以上経過してデータが集積されると、次に配置ユニットがカメラと相対的な測定部分の位置を、あるいは測定部分と相対的なカメラの位置を再配置する。更にセンサ技術を開発することにより、レーザー光線による機械的走査の必要性がなくなった。特に、エレクトローオプティカル・インフォメーション・システムズ・インコーポレイテッドにより製造されたイーオーアイエス・エムケー・セブン（ＥＯＩＳ　ＭＫ　ＶＩＩ）によれば、線形の光線アレイ、即ち線形のフリンジパターンを測定部分に投影し、カメラで写す。その場合、カメラが適切な光学的被写界深度（ｄｅｐｔｈ　ｏｆ　ｆｉｅｌｄ）でＸＹＺ座標データを集積するために、少なくとも二つのフリンジパターンを順に投影しなければならない。第二フリンジパターンは、光学的投影器のフリンジパターンを機械的に変化させたり、第二の投影器を用いることにより形成可能である。この第二のフリンジパターンは第一フリンジパターンに続くものであり、カメラが測定部分に対し数分の一秒間ほど静止するだけでよい。これら全ての応用例は、機械的配置装置を測定ポイント間あるいはカメラの視界（ｆｉｅｌｄ　ｏｆ　ｖｉｅｗ）間に設置することにより高精度の加速及び減速を可能にしているが、この配置装置の加速及び減速は処理時間の遅れの原因となっている。

【０００４】システムレベルでは、全体的な機能の速度を速める方法として、小量のデータ集積の場合にデータを「薄くする」方法がある。しかしながらこの方法を用いると、データ集積システムを詳細な表面の特徴及びきずが測定される表面検査、及び広範囲の表面が詳細に測定され記憶されるリバースＣＡＤ操作に利用しにくくなる。

【０００５】固定された投影パターンを使用する高速３次元（以下３Ｄと略す）表面マッピングセンサの最も大きな問題は、広範囲なＺ軸域（便宜上この用語を用いる。このＺ軸域は測定される表面に対しほぼ直角をなす）上において正確であるのみならず、Ｘ軸及びＹ軸（測定される表面とほぼ接する近接の軸）上においても高度な空間的解像度であるようなＸＹＺ座標表面マップを形成することができるかどうかという点にある。しかしながら従来技術、例えば陰影モアレ法（米国特許３，６２７，４２７；　４，５７７，９４０；４，５２５，８５８；　及び４，９３９，３８０）や、投影モアレ法（米国特許４，２１２，０７３；　３，９４３，２７８；　４，８５０，６９３；　及び４，８７４，９５５）や、投影フリンジモアレ法（米国特許４，０７０，６８３；　４，８６７，５７０；　及び４，８４２，４１１）では、この点を効果的に解決できない。高度なＸＹ軸空間解像度を達成できそうな移相モアレ法の基本方法も適当ではない。なぜなら格子パターンの場合フリンジ期間（ｆｒｉｎｇｅ　ｐｅｒｉｏｄ）の間何度も移相しなければならないため処理時間がかかり、比較的長い間測定部分を静止させなければならないからである。固定フリンジモアレ法（陰影型及び投影型、またカメラ光学的参照格子を備えるもの及び備えないものを含む）を利用すれば、もしフリンジパターンが高密度であればＸＹ軸において高い表面マップ空間解像度でありＺ軸において正確であるマップが実現可能である。原則的には、フリンジ方向（Ｙ軸方向）の空間的解像度はＣＣＤイメージカメラのピクセルサイズと同じである。フリンジパターンと直角方向（Ｘ軸方向）の空間的解像度は、投影されたパターン（複数の基本周波数よりなる複合フリンジパターンを含む）の最高基本周波数により設定されたナイキスト限界（Ｎｙｑｕｅｓｔ　ｌｉｍｉｔ）により決定される。フリンジパターンの画像コントラストが光学システム内に維持される限り、フリンジパターンが高密度となれば多くの測定上の利点が得られる。即ち、

（１）Ｘ軸においてより高い表面マップ空間的解像度が得られること　（２）Ｚ軸においてより高い測定感度及び解像度が得られること　（３）ＸＹ座標におけるより小さな表面パッチ部分が測定可能であることである。またこの高密度のパターンの欠点は、Ｚ軸における動的測定範囲がフリンジパターンの間隔により限定されることである。Ｚ座標において表面高さが変化するに従い、フリンジパターンのカメラ視界も変化する。フリンジパターンの基本周波数が完全に１サイクル変化すると、表面位置についての情報が失われる。これはモアレ法及び干渉計によるフリンジパターン処理において「２π問題」として知られており、Ｚ軸の動的測定範囲をほぼ１フリンジパターンサイクルの間隔に限定する。前記の従来技術を含む多くの技術を用いてこの問題を解決しようと試みたが、何れの方法によっても、高速のＸＹＺ座標表面測定及びマッピングを行うと同時に高密度のフリンジパターンにおける上記のような利点も実現するという、本発明の効果を達成できたものはなかった。

【０００６】前記の従来技術により２π問題及びＺ軸の動的範囲の問題を解決する方法の概略は以下の通りである。まず、連続的に異なったフリンジパターンを投影することにより、２πの曖昧性を軽減する方法がある。しかしながらこの方法は、データを集積しセンサに対して測定部分を静止させるためにある程度の時間が必要であるという点において、移相モアレ法と同様の問題がある。固定されたパターン技術においては、フリンジをコード化したり、基本フリンジパターンにさらに低い周波数のフリンジパターンを付加したり、あるいは２πの曖昧性を取り除くために特殊な「識別」加工をパターンに施すという方法が一般的である。これらの技術はそれぞれＺ軸動的測定範囲を拡大するが、「他にはない」高密度フリンジパターンの効果を喪失する。これらの技術によりＺ軸の測定精度を維持するためには、変形パターンにより生じる潜在的雑音またはエラーを軽減するより広範囲の画像フィルター処理が必要である。従って、測定可能なＸＹ座標における表面パッチがその他の場合より大きくなる。その結果、コーナー半径、エッジ輪郭、帯状部分、きず、鋸歯状部分などの細密な高速３Ｄ測定が必要である場合、これらの技術はあまり有用ではない。

【０００７】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、上記の従来技術における諸問題を解決するためになされたものであり、測定が行われている間センサを測定部分に対して静止させることなくＸＹＺ座標データをカメラの視界内に集積することが可能な３Ｄ測定システムを提供することを目的としている。また本発明はＸＹＺ座標データを作成する際に配置装置を機械的に動かす必要がないので、静止状態での測定も可能である。

【０００８】また本発明は、配置装置の加速及び減速を不必要にし、高速な配置装置を簡単な機械的構造で形成することも目的としている。その結果、高い信頼性があり、簡単で安価な配置装置が得られる。さらに本発明は、既存のＣＡＤソフト及びメニューを利用して操作者が直接的に操作することによりデータを操作したりデータをＣＡＤデータファイルに変換したりする（いわゆるリバースＣＡＤ機能）際に便利なように、データを作成することも目的としている。

【０００９】

【課題を解決するための手段及び作用】以上の目的を達成するために本発明は、少なくとも二つの電気信号から測定物の表面を決定するために使用される３次元表面形

状測定装置において、少なくとも測定物の表面部分を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段と、前記表面部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つの手段とを備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の視軸に対して第一角度をなす視軸を有し、その第二手段は前記第一照射手段の視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なり、前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気信号を送ることを要旨とする。

【0010】前記構成を有する本発明は、第一手段及び第二手段である二台のカメラをそれぞれ異なった位置に設置して同時に写し、高密度フリンジパターンを記憶させる。各カメラはそれぞれ異なった既知のジオメトリーで第一照射手段である投影器に（従って互いに）参照（reference）されているので、Z軸測定範囲における2πの曖昧性は解決できる。測定部分をセンサに対して静止する必要はないので、高速測定が可能であるだけでなく、高密度モアレフリンジパターンの全ての利点が得られる。

【0011】モアレ処理法の理論に基づく本発明はさらに、体積測定法または写真測量法に基づいた二台（またはそれ以上）のカメラによる表面マッピングシステムが有する、XY空間解像度の限界を克服することができる。この体積測定法及び写真測量法は、3D表面上の「識別可能な」点を写し、カメラが互いを参照する方法や各カメラ内で画像化された共通の点のパララックス差を知ることにより、これらの識別可能な点のXYZ座標を測定するものである。滑らかな表面の場合適切な識別可能な点がない可能性があるので、投影器が表面上の点に光学的に「タグ」を付け、それをカメラが写す場合もある。この投影されたタグ付きの点は、体積測定法または写真測量法の処理に使用される「共通」の点を選択する際に混乱されないよう、通常十分間隔があけられている。その結果、このようにして得られたXYZ座標表面マップのXY座標空間解像度は、本発明に基づき高密度フリンジパターンから得た解像度よりかなり低密度となる。またいずれのカメラに対する投影器の既知のジオメトリー的位置も、体積測定処理の一部として利用できない。

【0012】ウッドの米国特許4，842，411は、二台のカメラと一台のフリンジパターン投影器を備え、測定部分の3D表面を測定する体積測定センサを開示している。しかしながら、カメラに対する投影器ユニットのジオメトリー的配置はフリンジの体積測定処理には使用できない。従って、フリンジパターンの周期は、フリンジ処理の際の混乱を回避する、即ち2π問題を回避するためかなり長い。よってウッドの体積測定センサが二台のカメラを使用してはいるものの、二台またはそれ以上の各々のカメラに対する投影器のジオメトリー配置を利用した本発明の方が、高い表面マップXY解像度を得ることができる。

【0013】本発明のその他の利点としては、体積測定法よりも多くの表面データポイントが処理でき、それにより最適な回帰分析処理に基づくより正確な表面マップが得られる。本発明のある程度根幹をなすのは、センサヘッド及びデータ集積方法である。単一の投影器により測定部分に線形フリンジパターンを投影するのが最も簡単な方法であるが、本発明ではフリンジ投影器及びセンサであるCCDカメラ部に特殊な光学的技術を用い、画像コントラストを向上させてより高密度なフリンジパターンを得る。さらに、少なくとも二個以上の固体CCDカメラを用いて、投影器の視軸（line of sight；LOS）と相対的にそれぞれ異なる方向からフリンジパターンを写す。便宜上、この第一のセンサを精密カメラと称し、三角測量法の基準に基づいて投影器の視軸に対し通常15°から90°の間とする。第二のカメラは、その光学的視軸が精密カメラの光学的視軸または投影器の光学的視軸のいずれとも完全に一致しないことを条件に、任意の別の方向からほぼ同じ表面範囲を写す。通常3°以上異なっていればよい。便宜上、第二のカメラを粗目カメラと称す。これら二つのカメラから得たデータにより、センサヘッドの測定容量内の明瞭なXYZ座標データパターンが得られる。この測定容量は通常カメラの視界（field of view；FOV）であり、カメラの光学的被写界深度のほぼ半分である。第三のカメラは、精密カメラの光学的被写界深度の全体を測定するようさらに別の角度で設置されている。現存のビデオフレーム捕獲器（video frame grabber；VFG）により、画像のデジタル化及び集積が同時に可能である。さらに、現在測定システムに使用されているほとんどのCCDセンサは電気シャッタも備えられており、測定物を1ミリセカンド以下で「即時に」写すことができる。この場合シャッタ時間が短いため光の強度が不十分なので、ストロボ光照明器が投影器に用いられる。この方法で10マイクロセカンドの光パルスのストロボ光が得られる。白昼下の操作でも、整合した細い帯状の光学的スペクトルフィルターをカメラの前に設置した投影器と共に、（光学ファイバー素子を介して）レーザー装置を使用することができる。光学ファイバー素子は、レーザー光が測定部分から反射する時それ以上視準せず目に危険でないよう、効果的にレーザー光を分散させる。

【0014】XYZ座標データ処理のため画像を仮想上即時に集積するこの方法により、カメラを測定部分に対して静止または固定位置に配置するセンサ配置装置は不必要となる。従って、測定部分とセンサヘッドの両方あるいは何れか一方は、機械的加速及び減速機能に伴う時

間的制約を受けずに、高速データ適用範囲において連続的に再配置及び移動可能である。さらに、配置装置に必要な機械設備も、センサヘッドの測定容量及び視界が大きいため、かなり省略できる。特に、標準的な線型及び回転型エンコーダまたはその他の3D記録装置を用いて機械的位置を記録する限り、データ集積中の正確な機械的位置は重要ではない。線型及び回転型エンコーダからの配置装置についての出力、または3D記録装置からの配置装置についての出力は、カメラのデータ集積と同時にコンピュータ処理システムに送られる。これにより、カメラのXYZ座標から、全体座標系あるいは部分座標系に正しく座標変換することができる。また機械的正確さ、繰り返し、解像が厳密でなくとも良いので、測定システムの機械部分が簡略で安価となり、同時に高速化が可能である。

【0015】センサヘッドの視界が新しい測定位置へ移動すると、そのデータを標準コンピュータアレイプロセッサにより処理しXYZ座標データを得る。従って、機械的配置技術が根本的に制約を伴うのと対称的に、本発明はコンピュータ処理技術に応じた速度でデータ作成及び測定が可能である。その結果、その他のセンサ及びXYZ座標測定システムに比べ、現在のコンピュータ技術によってかなり高速で処理及びデータ集積が可能となる。将来コンピュータが開発されるに従い、データ集積のスピードを機械的配置装置のスピードとは無関係により高速にすることができるであろう。

【0016】本発明により測定部分の大量なXYZ座標データが短時間で測定できるので、きずの検出あるいは広範囲な測定部分上の微細な部分の検出が可能である。データ密度は通常、CCD精密カメラの各ピクセル（検出器素子）におけるXYZ座標データポイント数である。例えば、512X512型CCDカメラにより、各検出につき約250，000個のXYZ座標データポイントが得られる。1024X1024型CCDカメラも現在入手可能であり、各検出につき約1，000，000個のXYZ座標データポイントが得られる。512X512型カメラの測定精度は、光学的視界の1／2000から1／5000までである。1024X1024型CCDカメラの測定精度は、光学的視界の1／4000から1／10，000である。さらに高密度の2D型CCDカメラが開発されており、それにより本発明の目的はより高度に達成できる。線形フリンジパターンのカメラ視界及び投影部分は、カメラ及び投影器の光学素子を変更することにより簡単に変更可能である。

【0017】センサヘッド光学素子は、線形フリンジパターンに最適な形となっている。フリンジ方向に沿ってスリット穴が設けられており、その狭い断面幅により投影されたフリンジパターンの被写界深度を増大する。しかしながらスリットの長さにより測定容量中に1Dディフォーカスが維持されるので、投影器内のフリンジパターンに存在し得る塵粒子の影響は軽減される。これにより、円形穴が設けられた投影器よりもより低い性能及びコストの投影器のフリンジパターンを利用できるだけでなく、投影器をより厳しい環境下で操作することも可能である。またこのスリット穴は、円形穴よりも大量の光学的パワーを伝達できる。

【0018】センサヘッドの第二（あるいは第三）のCCDカメラを省略するために、線形複合フリンジ並びに線形及び疑似任意フリンジ加工をパターン内に含有できる特殊なフリンジパターンデザインを、この方法に利用することができる。これらの特殊なフリンジパターンは、徐々に変化する滑らかな表面の広範囲な測定部分に主に使用される。

【0019】本発明はまた、測定部分の形状に従い電気的にパターンを変化させるLCD型スクリーンを備えた、電気光学的フリンジパターン発生器が使用可能である。これらのパターンは、カメラが測定部分に対して静止している場合単に線形フリンジパターンに変化したり、あるいは測定表面の特徴（即ち測定表面が滑らかであるか複雑な形状であるか）に従い新しいパターンに変化したりすることができる。

【0020】本発明はリバースCADシステムへの新しいアプローチを提供する。僅かの測定ポイントを長い時間を費やして集積するのではなく、かなり大量のXYZ座標データ（メッシュまたは「クラウド」と称す）がモアレ法センサ検査ごとにほぼ即時に集積される。本発明のリバースCADシステムは、各検査により得られたこのデータ「クラウド」を、CADシステムに通常使用される3D表面表示体、例えばクーンズ パッチ（Coon's Patch）、ベジエ表面（Bezier Surface）、B－スプライン（B-Splines）、ナーブズ（Nurbs）等に即時に変換する高速プロセッサを備える。そして得られた3D表面は再び素早くCADモニター上に表示され、操作者がそれを「リアルタイム」あるいは「オンライン」で見ることができる。これらの3D表面モデルは位置制御プロセッサに情報を与えることもでき、これによりモアレ型センサの視界の軌道及び位置を自動的に計算し、制御できる。

【0021】このリアルタイムの表示により、操作者はオンライン操作でCADパラメータを再設定できるので、操作者の使用目的が達成可能となる。それぞれの表示ごとに、得られたXYZ座標3D表面モデルがどれほど実際の測定XYZ座標データに近いかを示す評価番号が操作者に与えられる。この評価番号により、操作者は測定部分に対してCADモデルをどれほど正確にしたいか技術的決定を下す。本発明では高速で、また高密度でデータを集積するので、操作者はリアルタイムのデータ表示にインターフェースしてこのリバースCAD機能を実施することができる。このシステムは大きく分けて、自動的にデータを出力する完全自動制御のリバースCA

D機能を持つ場合と、予め操作者が見て確認する場合とがある。

【0022】

【実施例】以下、図面を参照して本発明の実施例を説明する。本発明は種々のものに適用可能であるが、図1に示すような3次元表面形状測定装置に最も適している。

【0023】二台のカメラを備えた本発明の基本的なモアレ法処理技術を図1に示す。3D測定物体1は、二台のカメラユニット2、3及び単一フリンジパターン投影器4に写される。これらの光学的装置は、強固な設置台5上に設置されており、表面測定工程及びデータ集積工程の間光学的装置の相対的な配置が維持されている。図示しない移動装置により、設置台5及び／または測定物体1を相対的に移動させる。通常オフラインで測定以前に行う校正や配置により、カメラユニット2、3と投影器4の相対的なジオメトリー的関係を各々決定する。図示された各カメラユニット2、3は、イメージレンズ6及び標準ビデオCCDなどの2D検出アレイ装置7を備える。各カメラユニット2、3は参照格子を必要としない。図示された投影器4は遠隔白色光源8を備え、この光源8は光学ファイバー束9を介して光を投影器4へ送る。光学ファイバー束9はガラスのスライドフリンジパターン10を照明し、スライドフリンジパターン10は測定物体1上の表面パッチ11上に再び映し出される。以下、投影器4の光学的構造についてさらに詳細に説明する。

【0024】フリンジパターン10を伴った表面パッチ11は、二台のカメラユニット2、3により写される。スライドフリンジパターン10は通常ガラス製で、透明な帯と不透明の帯からなる一連の線形フリンジに形成され、ロンチ格子（Ｒｏｎｃｈｉ　ｇｒａｔｉｎｇ）として知られている。通常の光学的形状の場合、カメラユニット2の視軸（ＬＯＳ）を検査表面に対しほぼ直角に配置する。カメラユニット2を精密カメラと呼ぶ。投影器4の視軸はカメラユニット2の視軸より通常30°から90°離れている。カメラユニット3も基本的には同じパッチ表面を、投影器4の視軸とカメラユニット2の視軸とは異なった角度で写す。粗目カメラとなるカメラユニット3は通常、その視軸の角度が投影器4の視軸あるいはカメラユニット2の視軸から少なくとも3°以上離れて配置される。これらのカメラユニット2、3は、通常遠隔電気サポートユニット12に接続されている。この遠隔電気サポートユニット12及び白色光源8により、投影器4及びカメラユニト2、3よりなる小型センサが設置台5上で作動する。さらに、電気サポートユニット12及び光源8からの熱源がセンサから離れて設置されているので、測定がより正確になり、熱効果による有害な影響がより軽減される。白色光源8は、CCDユニットの雑音信号の条件に従い、連続型でもストロボ型でもよい。CCDユニットの電気サポートユニット12は通常電気シャッタを備え、これによりデータ集積の間測定部分に対しセンサが移動して画像がぼやけないようになっている。画像はさらに、光源8にストロボ白色光照明器を設置することによりCCDアレイ装置7上に固定できる。また、光源8は細いスペクトル帯の可視レーザー光、例えばHeNeなどと交換してもよく、これにより白昼下における測定も可能となる。この場合、カメラユニット2、3はCCDアレイ装置7の前に標準の細い通過帯域のスペクトルフィルターを備える。光学ファイバー束9はレーザーの視準性（ｃｏｌｌｉｍａｔｉｏｎ　ｐｒｏｐｅｒｔｉｅｓ）を効果的に除去し、レーザー光が投影面から乱反射しても目に安全となっている。

【0025】図1に示されているように、カメラユニット2、3の各CCDアレイ装置7上にほぼ即時に記憶された画像は独立のデジタル化装置13または共通のデジタル化装置に電気的に送られ、これらのデジタル化装置13はデジタル化されたデータをデジタル画像記憶装置14及び／または高速コンピュータプロセッサ15に送る。このコンピュータ構造により、高速プロセッサ15が画像集積速度で処理するとコンピュータ動力が不足である場合に、高速データ速度で二台のカメラの連続的なデジタル画像を記憶することが可能である。現在の技術により、プロセッサ15の処理速度が絶えず高速化しているので、画像記憶装置14の容量は重要ではない。この高速コンピュータプロセッサ15の出力は、センサ座標上のx_s, y_s, z_sデータである。このデータはさらに全体座標プロセッサ16により部分（または全体）XYZ座標系に変換される。このプロセッサ16にはセンサ及び／または部分配置装置17からのデータが入力される。プロセッサ16からの出力はデータ記憶ユニット18及び／または応用プロセッサ19に送られる。この応用プロセッサ19はシステム応用ごとに異なり、3D形状を寸法的に有効にし、表面検出やしわの検出、リバースCAD機能を実行する。

【0026】検査範囲である表面パッチ11上に投影された高解像度のフリンジパターンは、高精度で高解像度のXYZ座標マップを形成する。カメラユニット3はその同じパターンを写し、カメラユニット2がさらに同じパターンを写して個々にフリンジパターンの位置を決定することにより、標準的な単一カメラによるモアレ技術の限界を克服している。固定されたフリンジパターン技術の独特な点は、カメラユニット検出器の大きさと相対的に、XYZ座標表面マップの高空間解像度が線形フリンジ束の方向に沿って得られることである。フリンジパターンと交わる空間解像度が比較的小さいのは、関連する空間周波数がナイキスト基準として示される基本投影フリンジパターン周波数の原則により制限されるからである。

【0027】以下、図1に示す複数のカメラを用いた装置により「2π問題」を解決する方法について述べる。

この方法のフローチャートを図9に示す。投影モアレシステムがカメラAとB、及び単一投影器からなるものとする。各カメラが共通の測定表面から得る位相マップを、

【0028】

【数1】

$$\mathrm{CAM\ A:}\ i_a,\ j_a,\ \phi_a \qquad \cdots\ (1)$$
$$\mathrm{CAM\ B:}\ i_b,\ j_b,\ \phi_b$$

【0029】とする。i_a、j_a及びi_b、j_bはそれぞれカメラA、Bのカメラピクセル（イメージ素子、検出器位置など）値である。位相値ϕ_a及びϕ_bはラジアン表示で、投影位相パターンについて各カメラが写した移動量を表す。2π値はカメラが写した完全なフリンジ移動に関連するもので、事実フリンジ移動は多く起こっている。一般に、各カメラA、Bから最初に算出される原展開位相（ｒａｗ　ｕｎｆｏｌｄｅｄ　ｐｈａｓｅ）は$\delta\phi_a$及び$\delta\phi_b$であり、それぞれϕ_a及びϕ_bとの関係は以下の等式の通りである。

【0030】

【数2】

$$\phi_a=\delta\phi_a+2\pi N_a+\eta_a \qquad \cdots\ (2)$$
$$\phi_b=\delta\phi_b+2\pi N_b+\eta_b$$

【0031】この式において、N_a及びN_bは整数である。これらの正しい値を選択すること、即ち「2π問題」は、実際的なモアレ法センサシステムの設計において鍵となる。η_a及びη_bは$\delta\phi_a$値及び$\delta\phi_b$値が発生する際の「雑音」の原因となる。これらの標準的な偏差σ_a及びσ_bは、通常2πのほんの一部である（例えば$\sigma_a=\sigma_b\fallingdotseq 2\pi/100$）。

【0032】本発明の複数のカメラを用いた装置において、全てのカメラと投影器のジオメトリー的関係は既知である。各カメラはそのi、j、ϕの値をそれぞれ、部分あるいは全体座標系に基づきx、y、z値にマッピングする。カメラAについては、

【0033】

【数3】

$$\begin{aligned} x&=f_x(i_a,\ j_a,\ \phi_a)\\ y&=f_y(i_a,\ j_a,\ \phi_a)\\ z&=f_z(i_a,\ j_a,\ \phi_a)\end{aligned} \qquad \cdots\ (3)$$

【0034】であり、カメラBについては、

【数4】

【0035】

$$\begin{aligned} x&=g_x(i_b,\ j_b,\ \phi_b)\\ y&=g_y(i_b,\ j_b,\ \phi_b)\\ z&=g_z(i_b,\ j_b,\ \phi_b)\end{aligned} \qquad \cdots\ (4)$$

【0036】となる。この計算において、写される表面はZ軸方向に対して垂直ベクトルを本来有する（詳しくはZ軸に対し±45°以内）ことが仮定される。また、

【0037】

【数5】

$$f_z(i_a,\ j_a,\ \phi_a)=g_z(i_b,\ j_b,\ \phi_b) \qquad \cdots\ (5)$$

【0038】の関係式が成り立つので、N_aとN_bとは相関することがわかる。ここにおいて、$\delta\phi_a$及び$\delta\phi_b$の原位相の測定から個々にN_a（及びN_b）を決定する方法が得られる。（5）の式は次のような多項式に書き換えられる。

【0039】

【数6】

$$a_0+a_1\phi_a+a_2\phi_a^{\,2}=b_0+b_1\phi_b+b_2\phi_b^{\,2} \qquad \cdots\ (6)$$

【0040】但しaの係数はi_a及びj_aの関数であり、bの係数はi_b及びj_bの関数である。ほとんどの実際の

センサ測定の非線形期間は通常短い（但し$a_2 << a_1$、$b_2 << b_1$、またϕ_a及びϕ_bが数百ラジアンの最大値をとる）。従って等式（6）から得られる線形の関係は以下のように表される。

【0041】

【数7】

$$a_0+a_1\phi_a=b_0+b_1\phi_b$$

または

$$(a_0-b_0)+a_1\phi_a-b_1\phi_b=0 \qquad \cdots \quad (7)$$

【0042】N_a^*及びN_b^*を、等式（2）の関係を用いて等式（7）に対する解となり得そうな真の整数（通常未知である）とすると、次のように書き換えられる。

【0043】

【数8】

$$(a_0-b_0)+a_1\delta\phi_a-b_1\delta\phi_b$$
$$=(-a_1N_a^*+b_1N_b^*)\cdot 2\pi$$
$$-a_1\eta_a+b_1\eta_b \qquad \cdots \quad (8)$$

【0044】ノイズ期間、即ちη_a及びη_bは、2πよりもかなり短い必要がある。正確な条件については後に記載する。ここで複数カメラにおける2π問題は、同様の関係を満たすその他のN_a及びN_bが存在するかどうか判断できるまでに軽減される。これは以下のように表すことができる。

【0045】

【数9】

$$2\pi(-a_1N_a^*+b_1N_b^*)-a_1\eta_a+b_1\eta_b$$
$$=2\pi(-a_1N_a+b_1N_b) \qquad \cdots \quad (9)$$

【0046】これは以下のように書き換えられる。

【0047】

【数10】

$$\delta N_a=\frac{b_1}{a_1}\delta N_b+\eta_c \qquad \cdots \quad (10)$$

【0048】但し

【0049】

【数11】

$$\delta N_a=N_a-N_a^*$$
$$\delta N_b=N_b-N_b^*$$
$$\eta_c=\left(-\eta_a+\frac{b_1}{a_1}\eta_b\right)\frac{1}{2\pi} \qquad \cdots \quad (11)$$

【0050】この複合ノイズη_cは、以下の標準偏差を有する。

【0051】

【数12】

$$\sigma_c=\left[1+\left(\frac{b_1}{a_1}\right)^2\right]^{1/2}(\sigma/2\pi) \qquad \cdots \quad (12)$$

【0052】但し$\sigma_a=\sigma_b=\sigma$の条件が各々のカメラノイズ源に対し仮定される。精密カメラ、即ちカメラAに対して適切な可変範囲の拡張が可能かどうかの判断、つまりカメラAが、

【0053】

【数13】

$$-N_{max}\leqq N_a\leqq N_{max} \qquad \cdots \quad (13)$$

【0054】のようなN_a値の範囲で明白に機能することが可能かどうかの判断は、b_1/a_1の比率が鍵となる。但し通常は$N_{max}=5$である。しかしながらこのb_1/a_1の比率は、カメラA及びカメラBが投影器に対しどのように配置されているかに左右される。近似値としては、この関係は

【0055】

【数14】

$$a_1=\frac{P_0}{2\pi}\cdot\frac{1}{\mathrm{Tan}\ \alpha_P-\mathrm{Tan}\ \alpha_A} \qquad \cdots \quad (14)$$

【0056】

【数15】

$$b_1=\frac{P_0}{2\pi}\cdot\frac{1}{\mathrm{Tan}\ \alpha_P-\mathrm{Tan}\ \alpha_B} \qquad \cdots \quad (15)$$

【0057】または

【0058】

【数16】

$$\frac{b_1}{a_1}=\frac{1-\mathrm{Tan}\ \alpha_A / \mathrm{Tan}\ \alpha_P}{1-\mathrm{Tan}\ \alpha_B / \mathrm{Tan}\ \alpha_P} \qquad \cdots \quad (16)$$

【0059】但し、α_P＝Z軸に対する投影器の角度
α_A＝Z軸に対するカメラAの角度
α_B＝Z軸に対するカメラBの角度
P_0＝測定部分空間におけるフリンジパターン期間である。

【0060】一般的なセンサとしては、$\alpha_P=30°$及び$\alpha_A=0°$（精密カメラはZ軸に沿って整列されている）であり、粗目カメラ即ちカメラBの角度α_Bは0°から30°の間である。もし$\alpha_B=27°$（カメラBが投影器の付近）であれば、$b_1/a_1≒11$である。もし$\alpha_B=3°$（カメラBがカメラAの付近）であれば、$b_1/a_1≒1.1$である。b_1/a_1の正確な比率は校正工程から得られる。b_1/a_1が許容範囲の比率であるか否かは、等式（10）のノイズがない場合、即ち

【0061】

【数17】

$$\delta N_a=\frac{b_1}{a_1}\delta N_b \qquad \cdots \quad (17)$$

【0062】が、N_aの関連範囲において$\delta N_a=\delta N_b=0$以外のδN_a及びδN_bの解の整数を有するか否かによる。いま、比率を

【0063】

【数18】

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{NUM}{DEN} \quad \cdots \quad (18)$$

【0064】とする。但しDENはb_1/a_1の最少公分母とする。すると0でない最近似の整数の解は、

【0065】

【数19】

$$|\delta N_a| = NUM$$
$$|\delta N_b| = DEN \quad \cdots \quad (19)$$

【0066】となる。もしNUM≧$2N_{max}+1$ならば、ノイズなしの条件のための望ましい精密カメラの範囲（$-N_{max} \leq N_a \leq N_{max}$）において唯一の解が存在する。位相測定ノイズ（標準偏差σ）が存在する実際の測定上の条件においては、DEN値は以下の関係を満たさなければならない。

【0067】

【数20】

$$\frac{1}{DEN} \gg \sigma_c = \left[1 + \left(\frac{b_1}{a_1}\right)^2\right]^{1/2} \frac{(\sigma)}{2\pi} \quad \cdots \quad (20)$$

【0068】ここで、1/DENは等式（10）の期間、即ち（b_1/a_1）δN_bの最少の偏差を指す。この値はこの等式のノイズ期間よりも大きくなければならない。関係式20は実際にはそれほど制限的ではない。なぜなら比率b_1/a_1=NUM/DENは常に1（unity）よりも大きい、即ち、

【0069】

【数21】

$$\frac{1}{DEN} \gg \frac{NUM}{DEN} \frac{(\sigma)}{2\pi} \quad \cdots \quad (21)$$

【0070】または、

【0071】

【数22】

$$NUM \ll \frac{2\pi}{\sigma} \quad \cdots \quad (22)$$

【0072】であるからである。従って、もし位相測定ノイズがσ＝2π／100であるならば、$-5 \leq N_a \leq 5$の範囲において条件を満たす唯一のセンサの解はNUM＝11である。以下のような様々なカメラBの角度位置が可能である。

DEN＝1，2，3，4，5，6，7，8，9，10

（またはα_2≒27°，25°，22．5°，20°，17．5°，15°，　12°，9°，6°，3°）

前記の例σ＝2π／100において、カメラBの位置によって決められた可能な整数値がDEN＝1～18であるならば、δN_a＝NUM＝19（他のプライマリーナンバー）であれば、より広い可変範囲が可能であろう。この場合、N_aの範囲は$-9 \leq N_a \leq 9$である。

【0073】この方法はさらに、等式（6）が非線形の場合、及び比率b_1/a_1がカメラピクセル位置i_a、j_a、i_b、j_bにおいてより大きく変化する場合、同様に利用できる。後者の場合、b_1/a_1の変化は公称値の1/DEN期間よりもかなり小さくなければならない（ノイズ不等式（20）と同様）。この条件は、関連するほとんどのジオメトリックセンサにおいて、不等式（20）のノイズ上の制約があっても通常簡単に満たすことができる。非線形の場合、N_a及びN_bのとり得る値は等式（6）から得られ、条件を満たす唯一の解を得るため数学的シミュレーションあるいは実験を実施することが可能である。

【0074】図2（a）は図1の基本形測定システムの簡単な変形例を示す。図2（a）のシステムにおいて、測定部分の特徴やエッジに対し種々の配列で高空間解像度が得られる。精密カメラ21、粗目カメラ22及び投影器24は図1の実施例と同様の機能を果たし、垂直方向に配列されたフリンジパターン26を得る。パターン26の線形フリンジは精密カメラ21の視軸と投影器24の視軸を含有するジオメトリー的面とほぼ垂直である。また、粗目カメラ22はこの面内になくてもよい。従って、水平方向のフリンジパターン30を投影する投影器28を設置することが可能である。任意の一時点で投影器24と28のいずれか一方が作動する。しかしながら、カメラ21及び22の両方が同時に、垂直方向に投影されたフリンジ26と水平方向に投影されたフリンジ30のうちいずれかを写す。投影器光源32及び34に電気ストロボや機械的シャッタを設置し、投影器24と28間の変換を迅速に行うようにしてもよい。水平方向のほぼ45°以内に配列された測定部分のエッジに応答して、垂直方向のフリンジの投影器24が選択され、図2（b）（c）（d）のようなカメラの視界画像が得られる。垂直方向のほぼ45°以内に配列された測定部分のエッジに応答して、水平方向のフリンジの投影器28が選択され、図2（e）（f）のようなカメラ視界画像が得られる。CCD装置であるカメラ21及び22のカメラ視界に含まれる数個のCCD検出器あるいはピクセルのみにより、測定される表面に関する高密度なXYZ座標の情報を得ることが可能である。単一のカメラ及び投影器を使用する従来のモアレ法を、コード化された、あるいは複合のフリンジに使用しても、同じ狭い範囲内で高解像度を達成することはできない。なぜなら、前記の2π不明瞭問題を解決するためには広範囲な表面パッチが必要だからである。同様に、二台のカメラを用いた体積測定法は、識別可能な点が散在しており高解像度の表面XYZ座標データ及び3Dマップが得られないため、不適当である。

【0075】図3（a）は、一般的な目的に使用されるモアレセンサのさらに別の好適な実施例である。この実施例の測定システムには、狭い視界（NFOV）表面パッチを写す精密カメラ41及び粗目カメラ42に加え、広い視界（WFOV）の光学カメラ44が設置され、かなり広範囲の表面パッチを写すことができる。各投影器45及び46は、二つの並んだフリンジパターンを同時に写す。垂直フリンジ投影器45は、図3（b）に示すWFOVパターン47とNFOVパターン48を投影する。同様に水平フリンジ投影器46は、図3（c）に示すWFOVパターン49とNFOVパターン50を写す。これらのパターンのジオメトリー的配置は、狭いパターン48、50のうち使用される投影器が写したパターンの方を、NFOVの精密カメラ41とNFOVの粗目カメラ42が写すように配置される。狭い表面パッチやフリンジパターンが、高解像度の表面マップを必要としない広範囲の表面を覆うことができても、この場合広範囲の視界のモアレセンサに付加的な部分的及び／またはセンサ移動、及びデータ集積の機能が必要になる。しかし本実施例では、広範囲の投影パターン47、49を写すWFOVカメラ44を使用することによりこれを達成できる。本実施例は高解像度部分を含まない部分的表面に対し実施されるので、複合フリンジやコード化されたパターンを測定したり、2π不明瞭問題を避けるために輝光線（通常1．5フリンジ幅で、パターン47中の線51及びパターン49中の線52として示す）などの加工を加えたりすることが可能である。この実施に対しWFOV「粗目カメラ」を付加する必要はない。図3（a）の実施例に、他の装置が検査できるよう測定部分を全体的に照明するための、光学ファイバーを用いた光源53を設置してもよい。光源53の白色光照明器の光学的軸がNFOV精密カメラ41の光学的軸と一致する場合、図3（a）に示されたように光源53が環状である方が望ましい。これにより、モアレ法3D表面測定技術とは関係しない標準のエッジ探知装置を利用して、影部分のエッジ、穴、隆起などの位置をより正確に知ることができる。白色光源を使用中は、投影器45及び46の電源は切る。

【0076】図1、2、3（a）に示されたモアレセンサヘッドの重要な物理的特徴は、小型であるということであり、単純な機械的構造によって高速で単純な操作が可能となる。カメラユニットを形成するCCDカメラヘッドや小型のイメージレンズはこの目的に十分適している。標準的技術を利用した投影器では、カメラユニットによる画像集積に必要な十分な解像度、コントラストや光の強度で高密度なフリンジを投影する機能を果たすために、かなり大きくなる可能性がある。本発明によれば、図4（a）に示された小型の光学的装置の投影器によってこれらの機能を果たすことが可能である。この装置の部材を以下説明する。光源61は光学ファイバー束62の端部に位置し、光学ファイバー束62はさらに遮隔の電球63及び電源64に接続されている。光学ファイバー束62は、電球63の赤外線熱が投影器に届かないようこれを除去する。光源に使用される通常の電球63は、光線を光学束接続端部67に向けて視準する独自のコンデンサレンズ65を有する。電源から赤外線熱をさらに除去するために、光学的フィルター即ち熱ミラー68を光学ファイバー束62の前に設置可能である。

【0077】光学ファイバー束62から出た光はコンデンサレンズ部材70へ入る。コンデンサレンズ部材70の付近には、フリンジパターンが投影されたガラススライド71あるいはその他のパターン発生装置が位置している。光は再び光学的画像投影器装置72に焦点を合わす。この画像投影器装置72はフリンジパターン71の焦点を再び測定部分の表面に合わせ、フリンジパターン73を形成する。このフリンジパターン73は、完全に視準された明るいフリンジ及び暗いフリンジよりなり、元のフリンジパターン71から変化していないことが望

ましい。標準的な高密度のフリンジパターンは図4（b）に示すロンチ格子74であり、線形で交錯しており、等間隔で並んだ透明な帯と不透明な帯よりなる。画像投影器装置72内に通常設けられたピンホール穴75は様々な機能を果たす。例えば、穴が小さいことにより投影器が表面に垂直でない場合でも測定部分表面上の焦点を維持するので、投影されたパターンにおいてより大きな被写界深度が得られる。さらにピンホール穴75により、パターン中のあらゆる塵やその他の小さな破片を効果的に除去することができる。このピンホール穴75の短所としては、多くの場合大量の光が無駄になることである。この種の穴が利用されるのであれば、十分な光学的照射力を保証するためより高出力の光源やより大きなコンデンサレンズ部材70を設置する必要がある。しかしこうしてコンデンサレンズ部材70を大きくすると、全体の投影器が大きくならざるを得ない。

【0078】その他の例として、図4（c）に示すようにフリンジパターンの方向にスリット幅のスリット穴76を設け、図4（d）に示すようにコンデンサレンズ部材70を円筒状に形成した円筒状コンデンサレンズ77を設置してもよい。こうした形状であればより多い光量をシステム中に送ることが可能である。その結果、コンデンサレンズ及び投影器がより小型になる。スリット穴76のスリット長さにより、各フリンジパターンの横断方向ではなく長さ方向に沿って効果的にディフォーカスを形成する。従って、スロット幅はピンホール穴75の径と同じなので、長い被写界深度が維持される。フリンジ方向のディフォーカスにより被写界深度内のフリンジの質は劣化しない。1次元ディフォーカスにより、フリンジパターン71の各フリンジに現れるあらゆる傷やほこりが効果的に取り払われるので、投影されたパターン73の質はかえって向上する。光学的画像投影器装置72が非常に小さい投影パターン73を投影するように選択された場合、投影された際のロンチ格子74の基本的周波数は、ピンホール径あるいは単一スリット穴の狭い幅により決められた光学的回折限界値に近づく可能性がある。投影線形フリンジパターン73を形成するためロンチ格子74を変形すると、コントラストを向上できる。この場合、交錯した透明な帯と不透明な帯からなる標準的ロンチ格子に類似するように変形する。しかしながら、等間隔で並べる代わりに、図4（e）に示すように約75％が不透明な帯で約25％が透明な帯となるようにフリンジを並べる。標準のロンチ格子に比べこの形状では光の無駄が大きいが、光が送られる際のコントラストが向上し、またスリット穴76及び円筒状コンデンサレンズ77を使用することによりこれを補うことができる。

【0079】図5（a）は図4（a）の投影器の変形を示し、固定されたフリンジパターンが投影されたガラススライド71（標準的ロンチタイプでも変形ロンチタイプでもよい）を液晶ディスプレイ（LCD）あるいはそれと同等な電気制御の伝達（または反射）装置81に取り替えたものである。このLCD装置81は光学的性質を備えておらず、また標準の固定されたフリンジパターンのように直線ではないが、移相モアレ技術及び複数フリンジパターン投影技術の両方を実施するため、電気的にパターンを変化させることが可能である。水平及び垂直両方の固定されたパターンモアレ技術を可能にするため、これらのLCDパターンを固定させることも可能である。例えば、図2（a）の水平及び垂直フリンジ投影器24、28は、反射型を含む単一の電気制御されたLCD投影器82あるいはその同等物、及び二台のカメラユニット83、84と取り替えることができる。垂直フリンジパターン対しては、カメラユニット83が精密カメラとなりカメラユニット84が粗目カメラとなる。水平フリンジに対しては、カメラユニット84が精密カメラとなりカメラユニット83が粗目カメラとなる。投影器82の光学的視軸及びカメラユニット83の光学的視軸を含むジオメトリー的面は、投影器82の視軸及びカメラユニット84の視軸を含む面とほぼ垂直をなす面から約3°引いた位置になければならない。カメラユニット83の視軸と投影器82の視軸の間の角度は通常30°から60°であり、同様にカメラユニット84の視軸と投影器82の視軸の間の角度も30°から60°である。LCD81の変則形（anomalies）を補うため、図4（a）に示された単一スリット穴76を形成する。これにより、全ての変則形を各フリンジの方向に沿って効果的にぼかし、光学的画像投影器装置72により測定部分表面上に理想的な投影フリンジパターン73を再び画像化することが可能となる。

【0080】本発明の複数カメラによるセンサ技術により、図6、7、8に示す多くの検査システムの機械的構造が可能である。図6は、測定対象物100がセンサ102に対し完全に静止している状態を示す。センサ102は適した角度で移動し表面測定を完了する。本発明の小型センサ装置により、センサ102は高速で移動できる。測定表面に対し配置装置を停止させずに高速でXYZ座標表面パッチデータを得ることができるので、表面マッピング及びデータ集積の速度を大幅に向上することが可能である。この結果、XYZ座標データを分析できるCADエンジニアやその他の操作者が、測定がなされている間オンラインで操作することが可能である。従って、測定時に操作者がオンラインで操作に変更や変形を施すことができる。図7は、機械的配置装置がセンサユニット104と測定部分106の間で分割されている測定システムの変形例を示す。図8は、静止しているセンサ112に対し測定部分110のみが移動する測定の変形例を示す。本発明の各変形例は、本発明の全ての作動上の基本的性質を備える。

【0081】本発明は以上に示された例に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない限りにおいて種々の変形及び応用が可能である。

【0082】

【発明の効果】以上説明したように本発明の3次元表面形状測定装置は、測定中センサを測定部分に対して静止させることなく、XYZ座標データをカメラの視界内に即時に集積することが可能である。また本発明は、配置装置の加速及び減速が不必要であるため、高い信頼性があり、簡単で安価な配置装置にすることができる。さらに本発明は、CADソフト及びメニューを利用して操作者が直接的に操作するリバースCAD機能に便利なデータを作成することが可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の3次元表面形状測定装置を示す概略図である。

【図2】本実施例の二台の投影器の配置及び種々のカメラ視界画像を示す概略図である。

【図3】本実施例の三台のカメラと二台の投影器の配置及び二台のカメラにより投影された各パターンを示す概略図である。

【図4】本発明の実施例の投影器の概略図である。

【図5】投影器のその他の実施例の概略図である。

【図6】測定部分が静止しセンサが移動する場合の実施例の斜視図である。

【図7】測定部分及びセンサが移動する場合の実施例の斜視図である。

【図8】測定部分が移動しセンサが静止する場合の実施例の斜視図である。

【図9】「2π問題」を解決する工程を示すフローチャートである。

【符号の説明】

1 ・・・ 測定物

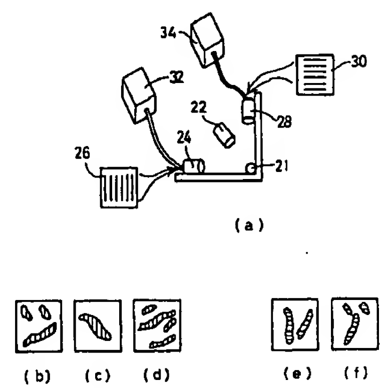
2、3 ・・・ カメラユニット

4 ・・・ 投影器

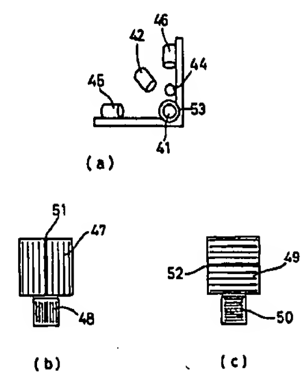
10 ・・・ スライドフリンジパターン

11 ・・・ 表面パッチ

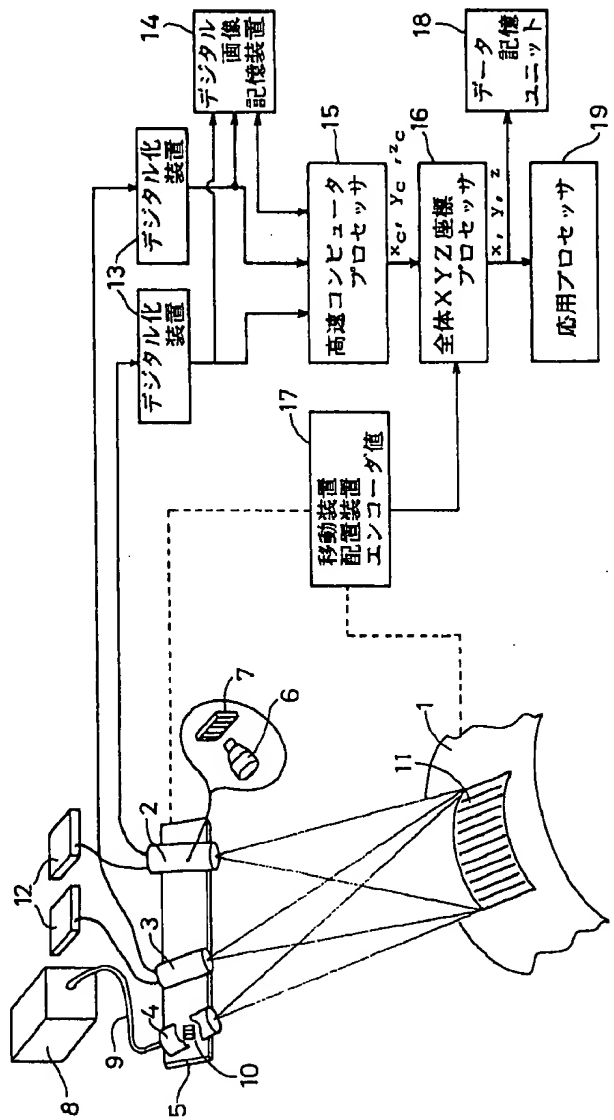
【図2】



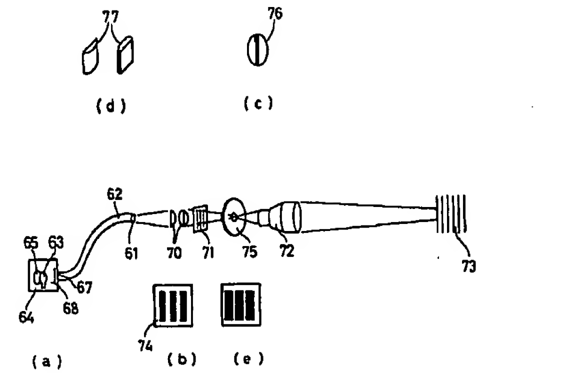
【図3】



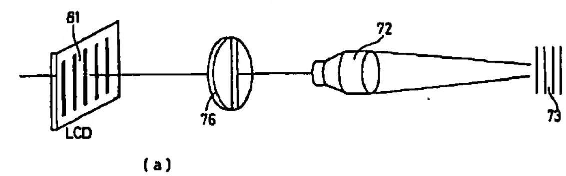
【図1】


デジタル化装置
デジタル化装置
デジタル画像記憶装置
高速コンピュータプロセッサ
全体XYZ座標プロセッサ
データ記憶ユニット
応用プロセッサ
移動装置配置装置エンコーダ値
x_c, y_c, z_c
x, y, z
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19

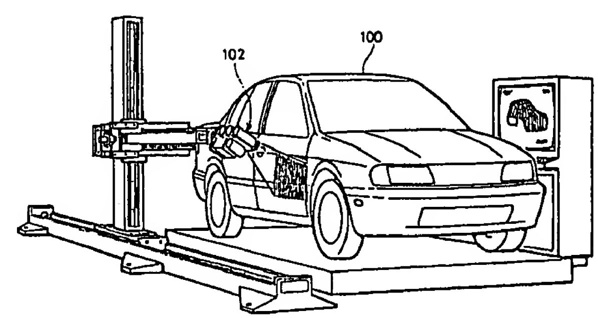
【図4】


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
61
62
63
64
65
67
68
70
71
72
73
74
75
76
77

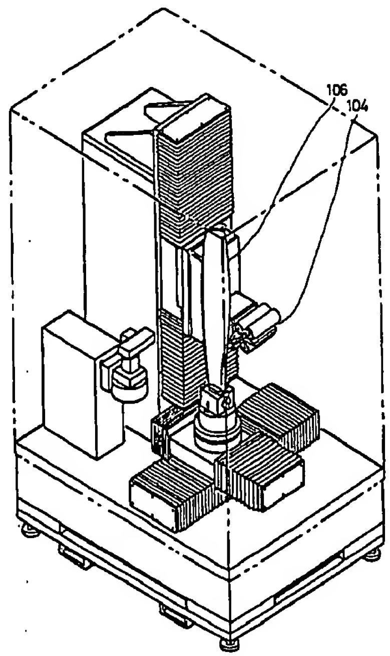
【図5】


(a)
(b)
LCD
81
72
73
76
82
83
84
約3°

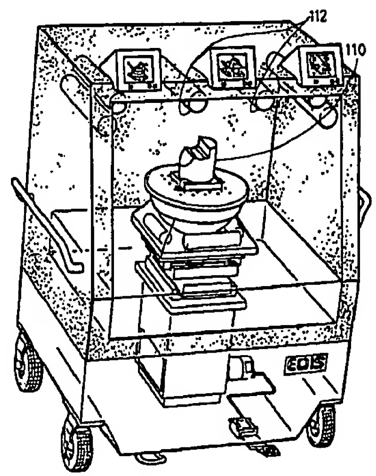
【図6】


100
102

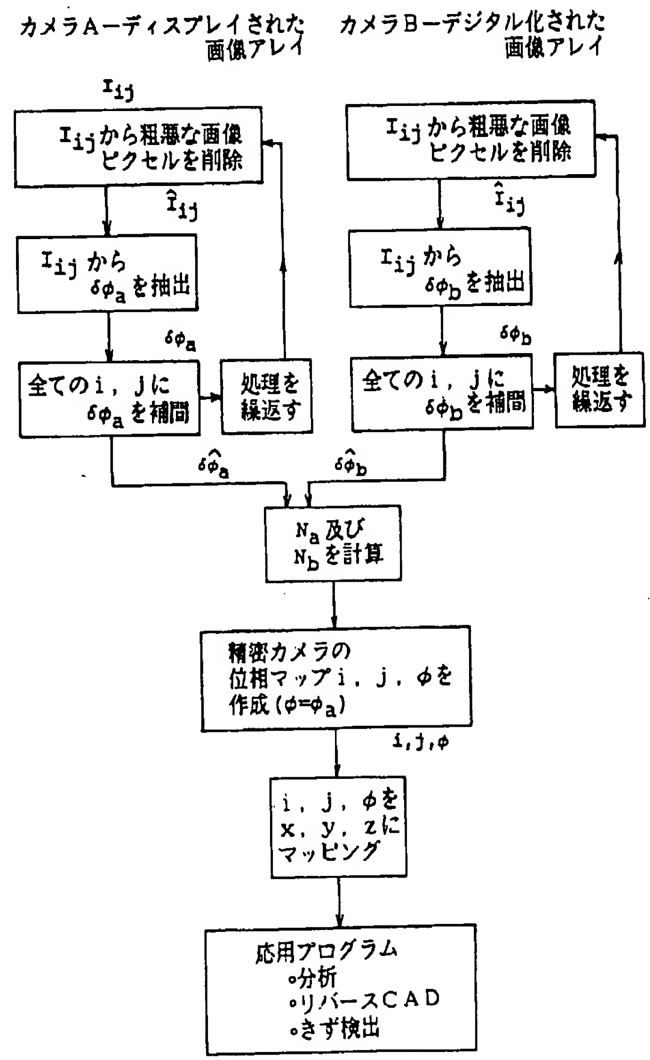
【図7】


106
104

【図8】


112
110
EOIS

【図9】


カメラA－ディスプレイされた画像アレイ
カメラB－デジタル化された画像アレイ
I_{ij}
I_{ij}から粗悪な画像ピクセルを削除
$\hat{I}_{ij}$
I_{ij}から$\delta\phi_a$を抽出
I_{ij}から$\delta\phi_b$を抽出
$\delta\phi_a$
$\delta\phi_b$
全てのi，jに$\delta\phi_a$を補間
全てのi，jに$\delta\phi_b$を補間
処理を繰返す
$\delta\hat{\phi}_a$
$\delta\hat{\phi}_b$
N_a及びN_bを計算
精密カメラの位相マップi，j，ϕを作成（$\phi=\phi_a$）
i,j,ϕ
i，j，ϕをx，y，zにマッピング
応用プログラム
∘分析
∘リバースCAD
∘きず検出

SERIES 1

[Three-Dimensional Engineering]

Optical Three-Dimensional Measurement

Edited by Tohru Yoshizawa

New Technique Communications

5.1.3 Projection of Color Pattern

In the conventional systems, monotonous patterns are projected as if marking in white and black is done in a space. This pattern projection, of course, may be done in colors[14]. Particularly as shown in Fig. 5.1.8, it is possible to form a continuous color distribution in a space by utilizing diffraction phenomena of diffraction grating using white light. In this case, the directions of light rays, diffracted, are univocally determined depending on their wavelengths (colors), respectively, and therefore, the color distribution is done as if ordering was done for each of the projected fringes. Accordingly, it becomes possible to determine the spatial coordinates in accordance with the principle of the tigonometrical survey. However, theoretically, it is necessary to identify the color (wagelength). For this reason, it seems necessary to obtain the stability and selectivity of wavelengths and to cut the peripheral light rays.

Reference Literature

[Collectively listed in the end of the next chapter (page 99)]

Fig. 5.1.8 (Translation of the drawing and the reference numerals are put on the end of this document.)

5.2 Grating Pattern Projection System Three-Dimensional Measurement

by Tohru Yoshizawa,
Department of Technology,
Tokyo University of
Agriculture and Technology

The grating pattern projection method is one of typical active measurements. An example of the optical systems is shown in Fig. 5.2.1. As seen in the figure, a grating pattern for use as a reference is projected onto an object to be measured, and the object is seen from an angle different from the projecting direction. Then, it is observed that the grating pattern is deformed according to the contour of the object (what is called a deformed grating image). That is, in case of a simple planar object, a liner grating pattern which is the same as its original pattern is observed. In case of a three-dimensional irregular object, an original grating pattern therefor deforms in accordance with the contour of the object, so that the pattern is looked curving. In fact, when a linear grating pattern (i.e., a reference grating) (which is obtained from a planar object as a reference) is superposed on the deformed grating image, contour lines due to so-called Moire fringes appear[2]. At this point of time, the three-dimensional data are included in the deformed grating image which is one of the two images superposed on each other (because it is impossible to include the three-

dimensional data in the reference grating composed of the linear pattern). Therefore, the Moire fringes are not necessarily formed so as to obtain the contour data. The basic idea of the grating projection system is therefore that the three-dimensional contour of an object is obtained by directly analyzing this deformed grating image.

Fig. 5.2.1

Supposing that the above deformed grating image is taken with a CCD camera in such optical setup as shown in Fig. 5.2.1, point **P** (X, Y, Z) on the object corresponds to a point **p** (x, y) on the image-forming plane (viewing plane) of the camera. The coordinate (X, Y, Z) of point **P** on the object is determined by the following equations (as the simplest expression).

$$X = (-b\sqrt{a^2 + b^2}x)/H$$

$$Y = (mab\sqrt{a^2 + b^2} - yb^2)\tan\theta_N/H \qquad (1)$$

$$Z = \{(ma^2\sqrt{a^2 + b^2} - yab)\tan\theta_N + y(a^2 + b^2)\}/H$$

wherein

$$H = (ma\sqrt{a^2 + b^2} - yb)\tan\theta_N + mb\sqrt{a^2 + b^2} + ay.$$

Fig. 5.2.2

Fig. 5.2.3

In the equations, m is an enlargement ratio (or a reduction

ratio) for photographing; and θ_N is an angle formed between a fringe of order N and the projecting axis. In this connection, only one fringe with a different width is included as a reference fringe of N = 0 so as to recognize the order N. It is thought that the idea of the pattern-projection system as described above is to add such an active effect that, for example, in case of stereoscopic photography, marking by projecting a grating onto an object to be measured is done by building a grating in one of two cameras. As a definite example, a grating pattern was projected onto an object (a Daruma doll) as shown in Fig. 5.2.2(a) so as to form a deformed grating image shown in Fig. 5.2.2(b). An analysis was made on the deformation of the fringe pattern based on this image, so that the result shown in Fig. 5.2.3 (a) was obtained[3]. In this state, the measuring points are limited on the fringes only. Therefore, in case where the density of measuring points is too coarse, the grating to be projected is slightly shifted so as to increase the density of the measuring points. Thus, it is possible to obtain close measuring points as shown in Fig. 5.2.3 (b) (however, this is not always a clever method because the phase shift method has now come into wide use).

This method makes it possible to analyze, if only a grating pattern is projected on an object by any means and

a deformed grating image is obtained therefrom. Therefore, besides the method of projecting a substantive grating using white light, other methods may be possible. The most popular method is that interference fringes caused by laser beams are utilized for such a small object as shown in Fig. 5.2.4. The results of the contour analysis are shown in Fig. 5.2.5. On the other hand, Fig. 5.2.6 shows a four-diameter magnified model of a molar tooth on which interference fringes are projected. Such deformed grating images are taken in from several directions for analysis of the contour thereof. The results are shown in Fig. 5.2.7. The contours of the biting face, cross-section, etc. of the molar tooth are easily created. It is, of course, possible to create a surface model of a whole of the molar tooth as shown in Fig. 5.2.8 by integrally combining the data of such contours. It is known from this figure that smooth combination of the data is performed. Further, it is also possible to make a substantial model of the molar tooth by machine grinding as shown in Fig. 5.2.9 under computer control using such data.

Fig. 5.2.4

Fig. 5.2.5

Fig. 5.2.6

Fig. 5.2.7

Fig. 5.2.8

Fig. 5.2.9

Fig. 5.2.10

In the above grating pattern projection system, it is possible to create the contour of an object in a dynamic state (because it is sufficient if only one image can be frozen). For example, it becomes possible to create a deforming state of a vibrating disc (24 Hz) as shown in Fig. 5.2.10 by projecting a grating pattern onto the object with a stroboscope to form a deformed grating image.

When an image is measured by pattern projection or the like, it is needed to increase the density of measuring points on an object and eliminate influences of variation of the projecting light intensity, the pattern which the object initially has, and so on. It is effective to employ the phase shift method (fringe-scanning method) as described above so as to eliminate the above influences. In other words, a plural number of images (generally formed on 3 or 4 sheets) which are formed by shifting the phase of the projected fringe are used[5)].

Suppose that a grating pattern having a sine transmission distribution is projected to an object, and that the intensity distribution $I(x)$ of a deformed grating image relative to a point **x** is determined by the following equation (2):

$$I(x) = A(x) + B(x)\cos[\phi(x) + \alpha] \qquad (2)$$

wherein $A(x)$ is a bias component of the intensity distribution; $B(x)$ is a contrast component of the fringe; α is an initial phase; and $\phi(x)$ is a phase resulting from the irregularity of the contour of the object. It becomes possible to find the contour of the object based on the optical setup if only the phase $\phi(x)$ is known. For example, in the four-screen system, the grating is shifted by every 1/4 pitch while α is changed to zero, $\pi/2$, π, $3\pi/2$ and so on, so that images having intensity distributions I_0, I_1, I_2, I_3 which correspond to the above gratings are introduced. Then, the phase distribution $\phi(x)$ is determined by the following equation (3) based on the equation (2).

$$\phi(x) = \tan^{-1}.I_3(x) - I_1(x)/I_0(x) - I_2(x) \qquad (3)$$

This facilitates the conversion of the resulting phase distribution of the fringes into contour data.

This process is definitely described with reference to Fig. 5.2.11. Fig. 5.2.11 (a) shows a fringe pattern which is projected to the face of a real person. It is desirable that the intensity distribution on this reference pattern as a prototype should have sine-wave-like intensity, in order to strictly apply the phase shift method. It is indicated that in case of a binary white-and-black pattern, the measuring result has cyclic small errors (which are easily known when observing its cross-sectional contour).

Analysis of the resulting deformed grating image (a) firstly provides a phase distribution (corresponding to the elevation of the contour) as seen in Fig. 5.2.11 (b). However, this result is folded back (namely, wrapped) at every one cycle. Therefore, it is necessary to sequentially connect these results while connecting the phases (unwrapping the fringes). The result of the phase connection as shown in Fig. 5.2.11 (c) is obtained anyway, although there arises several discussions on how to unwrap them. The observation of this result is the easiest way to know whether the measurement of the contour has been successfully done or not. This figure shows the data of the depth from the highest point to the lower portion by the variable density. This data of the depth is further converted into data of the contour, so that the three-dimensional coordinate values of the object can be obtained. The results obtained from this figure are shown in Fig. 5.2.23 put on the end of this chapter.

Fig. 5.2.11

To indicate the advantages of the phase-shifting system, for example, the mask of a doll which was painted white and the mask of a doll which was intentionally patterned with an oil paint were used as objects, and their contours were measured (by the grating projection method

which introduced the phase-shifting system). Fig. 5.2.12 shows the results of the measurement using four screens which display what does the whitened mask look like when phase-shifted by every 90 degrees. This figure shows that the measurement was performed at closer intervals than the intervals of the projected fringe pattern, and also that the irregularity of the contour of the mask was decided. Fig. 5.2.13 shows the results of the measurement of the patterned mask by the same method. It is apparent that the measurement was performed without the influence of the painted pattern on the projected fringes and that the same result as shown in Fig. 5.2.12 was obtained. It is necessary for the phase-shifting system that the fringes introduced should have a sine-wave-like intensity distribution. Otherwise, in case of projecting rectangular-wave grating, similar results to those of the sine-wave grating can be approximately obtained because of the shading effect. When the pitches of the grating are fine, an error is not so remarkable, but when the pitches of the grating are coarse, this approximation is not established, so that cyclic errors are caused, to which special attention must be paid[6]. When a grating of small pitches is used, "phase jumping" occurs at a site where difference of elevation of an object is large, so that the connection of the contours is not successfully done.

Fig. 5.2.12

Fig. 5.2.13

The grating-projection system for profiling (GRASP) was first used for diagnosis of scolinosis[4], and it is practically used for various commercial fields such as making of clothes[15]. Fig. 5.2.14 shows the results of the measurement of the contour of the grooves of a tire surface. In this case, the measurement is possible without special treatment on the surface of the tire (painting or the like). Fig. 5.2.15 shows an optical unit for a system for use in somatometry. As other practical application, this system is used for obtaining input data for CAD or CAM. Fig. 5.2.16 shows an example of clothes which is made based on data of the measurement of a human body using this measuring system (the data obtainable by this system are relative to the trunk of the body only but not to other portions of the body)[16]. Fig. 5.2.17 shows a reduced model of a statue of Venus which is formed by measuring the body of the Venus statue using this system, converting the results into data for CAM, and forming the reduced model from a photocurable resin by the three-dimensional lithographic technique[17]. Ultraviolet laser beams are sequentially irradiated and scanned so as to cure the liquid resin to form the model. The model on the left side

on the photograph is composed of the surface skin only.

Examples of the use of this system for the measurement of minute surface contours include the measurements of the broken section of a metal by tension, and the skin surface contour shown in Fig. 5.2.18 (which is an unusual example anyway). This is a trial to find the shapes and distribution of wrinkles around the corners of the eyes which were caused by aging[18]. As a result, a portion which has ever been hard to measure can be measured in quite a short time without contacting it. Thus, data for the basis of developing cosmetics are now being collected.

Fig. 5.2.14

Fig. 5.2.15

Fig. 5.2.16

Fig. 5.2.17

Fig. 5.2.18

In the meantime, the most keen interest in the above image-measuring system is measuring precision, particularly precision in the depth direction. As apparent from the equation (1), the level of precision has connection with 1) an error due to a geometric parameter quantity in association with the alignment and setting of the optical system, 2) an error due to the aberration of the optical system, 3) constraint due to the resolution of a camera,

the number of pixcels and the like, and other errors. For this reason, there is an idea of "the measuring precision is 0.5% of the size of a screen to be measured" which has been experimentally set up as one of deliberate criteria. However, it is very difficult to accurately check the measuring precision of a three-dimensional contour, and also there are various opinions on how to display it. Further, several discussions have been made on the grating projection system. As a result, it is recognized that the experimental examination for practical level has produced the idea of "a precision of 0.1% (2σ) of the size of a screen in the center portion of the screen measured". In order to have a higher level of precision, it seems necessary to improve the hardware or to divide the pixels by any means.

The pattern projection method, having been developed as above, recently has been achieved to a level of commercial production, and many systems which have been achieved based on similar principals are now being introduced into the market. The latest technical tendency is described below by picking up interesting examples from such systems[19)].

Fig. 5.2.19 shows an example of COMET system (Steinbichler, Germany) which is used for analysis of a projected grating image. According to the material data,

it is said that the contour of an object can be computed by using not only relative values but also absolute coordinate positions (by introducing the idea of the tigonometrical surbey). It is said that the precision of a measuring region of 180 x 240 mm is 0.1 mm in the depth direction.

Fig. 5.2.19

In case of OptoShape system of Massen (Germany) (see Fig. 5.2.20), the most remarkable feature rests in that a pattern is projected by using a liquid crystal grating. One of advantages thereof is that the phase of a pattern can be shifted without a mechanically moving part. We have experimentally known that an error in shift amount due to movement often arises when a grating or the like is moved by using a motor or a piezoelectric element. In this view, the use of liquid crystal grating makes it unnecessary to use such moving parts. In addition, the pattern projection method has a problem in that, depending on the contour of an object, the projected fringe pattern has too close intervals to distinguish them, or that the fringe is discontinued (in case of an object having high undulation) to make its corresponding relation indefinite. Therefore, it is thought that the use of a liquid crystal grating makes it possible to overcome the above problem by designing a pattern which has optimal intervals relative to

an object and projecting such a pattern to the object. It is said that the precision of a measuring head is 0.1 mm relative to a measuring region of 140 x 108 x 100 mm.

As described above, the use of a liquid crystal grating is excellent as an idea. However, there still remain two actual problems unsolved: one is that to what level a refined liquid crystal pattern can be created, and the other is that to what level the gradation of the liquid crystal grating can be improved. For the present, it is hard that a liquid crystal grating for use in a projector or the like can have a wide range of gradations corresponding to a wide range of voltage. To achieve this subject matter, it is demanded to develop an element suitable for such a purpose without using an existing liquid crystal device.

Fig. 5.2.20

Finally, there remains a subject matter of achieving measurement in a shorter time. Generally, the phase shift method is used for analysis of fringe by a computer. In many cases, the method using a plural number of images which are formed based on the temporal phase-shifting system is employed. On the other hand, to measure a dynamic object, it is also possible to introduce only one fringe image and perform spatial phase-shifting on the

image by computer-processing. We take the technique called "one-step phase-shifting" as an example of such a trial[20].

This idea is effective in case where it is impossible to instantly introduce a plurality of images because an object thereof rapidly changes with the time as in case of measurement of fluid. If this idea is deduced, it becomes possible to measure a dynamic change of the contour of an object by employing the pattern projection method. Fig. 5.2.21 shows several of the results of measurement of changes of the contour of a vibrating disc with the time, wherein the results of such changes are taken at every 1/60 sec.

The ultimate of time-shortening measurement reaches an idea of real time measurement. The real time measurement, in many cases, aims at processing by some hardware rather than processing by a software using a computer. The PROJECT D system (shown in Fig. 5.2.22) which has been developed last year by Carl Zeiss (Germany) applies the method of real time analysis of interference fringe which is developed for measurement of the contour of optics or the like, for instantly analyzing a projected pattern so as to obtain the contour of an object. According to this system, the resolution is 10 μm when the depth is 140 mm, and the time taken in measuring is only 40 m.sec. For better understanding of the present state of achieving real

time measurement, refer to another chapter in which it is described in more detail.

Once it has become possible to obtain three-dimensional coordinate values anyway as described above, then, it becomes important how attractively the result is displayed. It is quite tasteless to display only a wire-frame-like image, for example, as shown in Fig. 5.2.23(a). Thus, there are trials to paste such measured data with the same colors and textures as those of a real object. Fig. 5.2.23(b) shows one examples of such results in which the color data and surface texture of a real person are superposed on the data of (a). The resultant image is very realistic. In addition, it is, of course, possible to sequentially and freely rotate the resultant image or irradiate it with light from an optional direction for comparison[21).

In this chapter, the outline of the present state of the pattern projection system has been described. Products manufactured based on the above principals already have been put on the market, and it is expected that the three-dimensional measuring technique will establish its own field by further sophisticating the system in the near future.

Fig. 5.2.21

Fig. 5.2.22

Fig. 5.2.23

Reference Literature

1) W. Frobin, E. Hierholzer: Applications of Human Biostereometrics, SPIE Proc. 166, pp. 39-44 (1978)

2) Yoshizawa, Suzuki, Tashiro: O plus E, No. 87, pp. 56-61 (1987)

3) Kensaku Suzuki, Tohru Yoshizawa: Bulletin of the Precision Engineering Association, 53, 3, pp. 422-426 (1987)

4) T. Yoshizawa et al.: Surface Topography and Spinal Deformity, pp. 403-410 (Gustav Fischer Verlag, 1987)

5) Ryohei Komatsubara, Tohru Yoshizawa: Bulletin of the Precision Engineering Association, 55, 10, pp. 1817-1822 (1989)

6) Komatsubara, Katase, Yoshizawa: Bulletin of the Precision Engineering Association, 58, 7, pp. 1173-1178 (1992)

7) Hirosuke Satoh, Seiji Iguchi: Paper of the Electronic Communication Association, J680-D No. 3, pp. 369-375 (1985)

8) M. Takeda, K. Mutoh: Appl. Opt. 22, 24, pp.3977-3982 (1983)

9) M. Suganuma, T. Yoshizawa: Opt. Engg. 30, 10, pp.1529-1533 (1991)

10) J. Bruning et al.: Appl. Opt. 13, 10, pp.2693-2703 (1974)

11) D. Malacara: Optical Shop Testing (2nd Ed.) (wiley,

1992) (which describes in detail the phase shift method)
12) V. Srinivasan, H. Liu, M. Halioua: Appl. Opt. 23, 18, pp.3105-3108 (1984)
13) Special edition of Super-Precision Surface Contour Measurement which refers to commercially available apparatus is included in "Optical Technique Contact", 26, 11 (1988)
14) Tajima, Iwakawa: Bulletin of the Electronic Communication Association J73-D-II, No. 3, pp.374-382 (1990)
15) Matsuyama, Uetake, Yoshimura, Komatsubara, Yanagisawa: Bulletin of the department of domestic science of Ohtusma Women University, No. 26, pp. 77-85 (1992)
16) Etsuko Niwa: Idea of Clothe Designing by Computer Aiding (1-3) (the name of the bulletin and vol. No. are unknown)
17) Nagamori, Hirano, Satoh: O plus E, No. 133, pp.117-123 (1990)
18) An article of "Asahi News Paper" (October 30, 1990) or "TRIGGER", 10, 3, pp.54-55 (1991), Yukiko Kawaguchi, Osamu Kaneko, et al.: J. Soc. Cosmet. Chem. Japan, 28, 2 (1994), pp.153-162
19) Tohru Yoshizawa: O plus E: No. 202, pp.80-87 (1996)
20) R. Gu, T. Yoshizawa, Y. Otani: Optics and Lasers in Engineering, 21, 1-2 (1994), pp.61-75

21) Masayuki Yamamoto et al.: Bulletin of the Autumn Meeting of the Precision Engineering Association (1997), p.460

It is said that this system creates a three-dimensional contour by applying a laser beam to resin powder according to the data of two-dimensional slices of the contour of an object and curing the resin powder, and sequentially laminating the cured sections of the slices to form a three-dimensional contour. Further, such a three-dimensional contour is formed using ceramics, and also, there is a trial to form such a three-dimensional contour from a metallic substance by using a corpuscular beam instead of a laser beam. Recently, there is reported a further trial to form a three-dimensional contour with a higher strength by solidifying metal powder by the use of a laser beam. In addition, various systems for forming three-dimensional contours using liquid photocurable resins are proposed in both domestic and foreign countries. In the present state of the technique, it will be very easily achieved to send a three-dimensional facsimile formed by modeling a liquid photocurable resin. As data to be used, results based on not only virtual values but also found values of actual measurement can be used. For example, the contour of an object is formed by Moire fringe, and a resin is cured in conformity with the resultant form. Needless to say, it is of course possible to enlarge or reduce, or modify the contour of a mockup.

We are planing to publish several books with the theme of "Three-Dimensional Engineering" as one of "O plus E" series. In consideration of "three-dimension", there is a tendency to put importance on "three-dimensional display" or "three-dimensional measurement". However, these fields are having wider and wider ranges, and in association with this, importance of "three-dimensional processing" such as machine working is increasing. For this reason, this plan is intended to integrate various techniques of the relating fields and to attract public attention to the necessity to newly recognize "three-dimension" from various view points. From this point of view, we title this book "Three-dimensional Engineering", and venture to ask for public opinion by sending out "Optical Three-Dimensional Measurement" to the world, standing on our position that the use of light makes it possible to measure up to this level, firstly, in view of the three-dimensional measurement. It would be our pleasure if this book could contribute to your initial guidance to "Three-Dimensional Engineering".

OE Series

Three-Dimensional Engineering 1 - Optical Three-Dimensional Measurement

First edition issued on March 8, 1993
Second revised edition issued on December 14, 1998

Edited by Tohru Yosizawa
Issued by Kaname Matsushita
Publicated by K.K. New Technique Communications

Mail No. 169-0073, 2-16-13,
Hyakunin-cho, Shinjuku-ku, Tokyo-to
Telephone No. (03) 3371-0241
(Representative)

Translation of the Drawings

Fig. 5.1.8 Diffracted Light System Apparatus (Tajima, Iwakawa)

1 = a measuring region, 2 = an ifrared transmission filter, 3 = a xenon lamp, 4 = a collimator lens, 5 = a slit, 6 = a diffraction grating, 7 = a cylindrical lens, 8 = an image pick-up plane (a x-y plane), 9 = a CCD camera, 10 = (reference position), 11 = a computer, and 12 = a frame memory.

Fig. 5.2.1 Principle of Grating Projection Method

1 = an object, 2 = a CCD camera, 3 = a projector, 4 = a grating

Fig. 5.2.2 Object (Daruma Doll) and Image of Deformed Grating

(a) An object (daruma doll)

(b) Image of deformed grating (the thick band is a reference)

Fig. 5.2.3 Display of Measurement Results

(a) Fringe of 8.9 mm interval on the reference face

(b) Projected fringe having closer intervals by shifting the grating by every 1/4 pitch

Fig. 5.2.4 Image of Deformed Grating Due to Interference Fringe (10-cent coin with 17.8 mm diameter)

Fig. 5.2.5 Analysis of Surface Contour of Coin

(a) Display of a wire frame

(b) Section A

1 = height, and 2 = a position (mm)

(c) Section B

1 = height, and 2 = a position (mm)

Fig. 5.2.6 Image of deformed grating obtained by projecting interference fringe onto a molar tooth (a model magnified 4 diameters)

Fig. 5.2.7 Analysis of the contour of a molar tooth (a model magnified 4 diameters)

(a) the contour of a cross-section
(b) the contour of a side
1 = a cut position
(c) the contour of a biting face

Fig. 5.2.8 Surface Model of Molar Tooth

Fig. 5.2.9 Restoration of a biting face by machine-grinding

Fig. 5.2.10 Vibrating disc (the left) and contour lines (the right)
The number of vibration is 24 Hz.

Fig. 5.2.11 Process of Analysis of Image (the final results are shown in Fig. 5.2.23.)

(a) Image of deformed grating

(b) Result of phase computation
(c) Result of phase connection (display of the density)

Fig. 5.2.12 Measurement of Mask of Kewpie Doll (Painted White)

(a) Whitened mask
(b) Display of a wire frame as the result of measurement

Fig. 5.2.13 Measurement of Mask of Kewpie Doll (Patterned with Color Oil Paints)

(a) Mask intentionally patterned
(b) Display of a wire frame as the result of measurement

Fig. 5.2.14 Measurement of Surface of Tire

(a) Display of a wire frame
(b) Contour of the surface grooves
1 = height, and 2 = a position (mm)

Fig. 5.2.15 Equipment for Grating-Projection System for Profiling (GRASP)

Fig. 5.2.16 Application to Making of Clothes (Niwa)

(a) Basic model created by the grating-projection system
(b) Paper model
(c) Dress made by decorative designing

Fig. 5.2.17 Formation of Model Using Photocurable Resin (Mitsui Zosen)

Fig. 5.2.18 Measurement of Wrinkles of Eye Corner (Shiseido)

(a) Display of a wire frame as the result of measurement of wrinkles
(b) Profile of the section

Fig. 5.2.19 COMET System (Steinbichler)

(a) External appearance of a measuring section
(b) Setup of optical system
1 = a lens, 2 = a CCD camera, 3 = a light source, 4 = a grating, 5 = a lens, and 6 = an object

Fig. 5.2.20 Introduction of Image Using OptoShape System (Massen)

1 = an image of deformed grating, 2 = a bias image, 3 = a contrast image, 4 = a result of computation of the phase, 5 = a mask, and 6 = a final phase image.

Fig. 5.2.21 Example of Measurement of Vibrating Disc

1 = a rubber plate, and 2 = a linear motor.

Fig. 5.2.22 PROJECT D System (Zeiss)

Fig. 5.2.23 Superposition of Texture on Three-Dimensional Coordinates

(a) Display of a wire frame
(b) Result of superposition of colors and texture